心理科学进展 2018, Vol. 26, No. 7, 1213–1222
Advances in Psychological Science DOI: 10.3724/SP.J.1042.2018.01213

光照的警觉性作用*

毛天欣[1] 熊 晓[1] 李静华[1] 姚 颖[1] 杨 健[1] 李笑然[3] 周国富[2,3]

([1]华南师范大学心理学院, 广州 510631) ([2]华南师范大学华南先进光电子研究院
广东省光信息材料与技术重点实验室&彩色动态电子纸显示技术研究所, 广州 510006)
([3]深圳市国华光电科技有限公司, 深圳 518110)

摘 要 光照除了传统的视觉作用外, 还具有一定的非视觉效应, 包括调节昼夜节律、褪黑素分泌和警觉性等生理功能和行为表现。随着光照对生理节律影响研究的不断深入, 近来很多学者开始关注光照的警觉性作用。我们根据最新研究进展总结了: (1)警觉性的测量工具; (2)光照强度、时长、时间点、波长、色温等对光照警觉性作用的影响; (3)光照在治疗情绪障碍、调节生理节律、完善办公照明方面的应用; (4)提出了继续探讨光照警觉性作用的神经机制、优化参数特征和探讨混淆变量的研究方向。

关键词 光照; 警觉性; 褪黑素; 自主感光神经节细胞; 生理节律
分类号 B845

1 引言

人类视网膜上存在视锥细胞和视杆细胞两种感光细胞。当光线进入人眼后, 视锥细胞和视杆细胞接受光信号, 并通过视神经传递给大脑视觉皮层, 形成视觉体验。随后研究者发现视网膜上还存在一种新型的感光细胞(Berson, Dunn, & Takao, 2002), 这种细胞能够合成感光蛋白——黑视蛋白, 并且具备自主感光的能力, 又被称为自主感光神经节细胞(intrinsically photosensitive retinal ganglion cells, ipRGCs)。ipRGCs的发现逐渐让人们认识到, 眼睛不仅具有传统感光细胞的视觉效应, 还具有了非视觉效应。ipRGCs分布在整个视网膜上, 占视网膜神经细胞的1% ~3%, 它们将接受到的光信号传递到大脑的生物钟——下丘脑视交叉上核(suprachiasmatic nucleus, SCN), 而SCN又与控制人体某些激素分泌的松果体相连, 由此实现对生理节律的调节以及激素分泌的控制(曾强, 何士刚, 2011), 如图1所示。随着光照对SCN昼夜节律调节作用的深入研究, 研究者开始将目光转向光照对警觉性的影响(Vandewalle et al., 2013)。警觉性指人在完成任务时保持注意力或警惕程度的水平。SCN参与启动生命的代谢、生化及物理过程。在清醒之前, SCN激活皮质醇大量分泌, 同时启动其他影响觉醒的重要环节。通常, 当机体晨起接受日光照射后, 核心体温、警觉程度、认知水平均提高, 同时激发大脑产生更多的5-羟色胺, 提高情绪及机体活动力。到了夜间, SCN抑制皮质醇的分泌, 促使松果体分泌褪黑素, 降低机体的警觉度及反应能力, 降低核心体温(董栩然, 王旻舒, 刘梦媛, 王薇, 2014)。

光照的非视觉生物效应包括重置昼夜节律的相位、抑制褪黑素的分泌和提高即时警觉性等。这三者之间又相互影响, 且均取决于光照强度、时间点、时长、光谱成分及光照之前的照明体验这些特征(Cajochen, 2007; Adamsson, Laike, &

收稿日期: 2017-06-19
* 获国家重点研发计划项目(2016YFB0404202); 国家自然科学基金项目(U1501244, 51561135014); 广东省创新科研团队(2013C102); 教育部"长江学者和创新团队发展计划"项目滚动支持(No. IRT_17R40); 广东省重大科技专项项目(No. 2015B090913004); 华南师范大学研究生创新计划项目资助(2017WKXM007); 广东省光信息材料与技术重点实验室(2017B030301007); 广州市类纸显示材料与器件重点实验室(201705030007); 教育部光信息国际合作联合实验室; 国家高等学校学科创新引智计划111引智基地项目。
通信作者: 周国富, E-mail: guofu.zhou@m.scnu.edu.cn

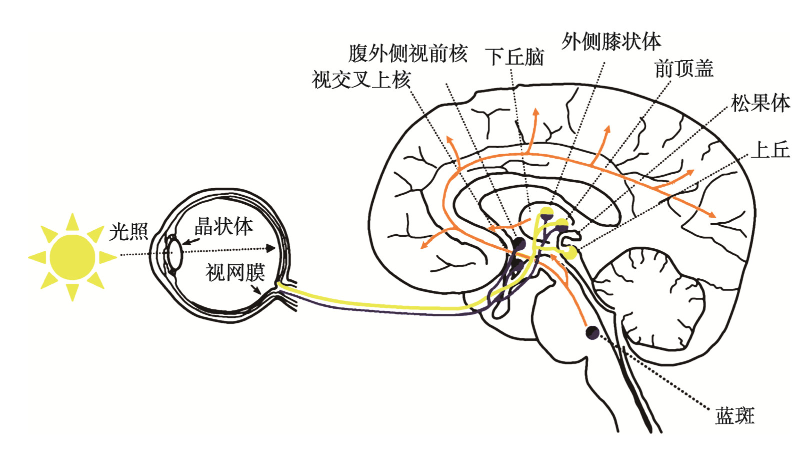


图 1 光照激活大脑非视觉区域的路径图(资料来源：Cajochen, 2007)

Morita, 2017)。目前，关于光照警觉性研究大都只是考察了光照强度、光照时长、光照色温、光照波长、光照时间点等众多影响因素中的一个或几个，并且结果也存在一定的分歧。基于此，我们将从警觉性的测量工具、光照的警觉性的影响因素、光照在临床和非临床上的应用等方面对前人的文献进行梳理总结，以期为后人的研究提供参考依据。

1 警觉性的测量工具

1.1 主观测量工具

对健康个体来说，警觉性可以通过简单的询问或者主观评定得到。目前应用比较广泛的主观测试量表有卡罗林斯卡困倦度量表(Karolinska sleepiness scale, KSS) (Horne & Burley, 2010)和斯坦福嗜睡量表(Stanford sleepiness scale, SSS) (Martinez et al., 2011)。KSS 包括 1 个题目，9 点记分：1=极度清醒，2=非常清醒，3=清醒，4=比较清醒，5=既不清醒也不困乏，6=有点困乏，7=有点困乏但无须费力保持清醒，8=非常困乏，需努力保持清醒，9=极度困乏，需极力保持清醒。SSS 从 1 到 7 七点记分。1 指完全清醒、精力旺盛，7 指基本无意识、接近睡眠。

1.2 客观测量工具

主观评定的缺点是，个体在较亮的光环境中可能会直观地认为更加警觉，并且对于光来说没有真正的安慰剂对照组。因此，在光照实验中就需要更多客观的测量工具，最常用的就是精神运动警觉性测验(psychomotor vigilance test, PVT) (Dinges & Powell, 1985)。PVT 是一个简单的反应时任务。在测试中，视觉线索以伪随机方式反复呈现，刺激时间间隔范围是 2~10 秒。当线索呈现时，被试需要尽可能快速地按键，然后激活下一次测试。它的优点是对反应时的增加和注意脱漏非常敏感，而且学习效应很小；缺点是它测量的是持续性注意而非警觉性或疲劳本身。

1.3 生理指标

在警觉性研究的早期阶段，眨眼频率、皮肤阻抗、体温以及血压等生理信号都曾被用来评估警觉性。目前研究使用的神经生理学指标主要包括脑电前额叶低活性的波(1~7 Hz)、眼电的慢速眼动和眨眼速率(Cajochen, Khalsa, Wyatt, Czeisler, & Dijk, 1999)。这种高时间分辨率的测量可以在秒的范围内检测是微睡眠还是任务失效。但是，这种测量在实际操作时会干扰被试本来的性质，例如在现场研究中会干扰晚上值班工人的脑电活动。除此之外，收集唾液来测定褪黑素、皮质醇、淀粉酶也是常用的一种生理指标，且通常需要收集 1~2 ml 唾液，然后把唾液冷冻起来送到实验室测定分析(Figueiro & Rea, 2010)。

2 光照的警觉性效应的影响因素

2.1 昼夜节律对光照警觉性的影响

昼夜节律(circadian rhythm)是指生物体各种生理机能为适应外界环境的昼夜变化而建立起的规律周期。在长期生物进化过程中，生物体内发育分化出一个特殊的“器官”—生物钟来协调不同组织与器官的昼夜节律。哺乳类动物调控昼夜节律的中枢位于下丘脑的 SCN。内源性的调节中枢由光照进行调控。昼夜节律的光协同过程使得生物体的昼夜节律与自然节律同步，并不断调整生

理周期及行为表现。警觉性和生理节律中的核心体温有紧密的时间关系：晚上核心体温最高，清晨核心体温最低。刚睡醒时对警觉性的不利影响在接近最低核心体温时最强烈。稳定且高水平的警觉性只有在内源性昼夜计时系统和睡眠/觉醒周期处于特定关系下才可能实现。这种关系就是内源性昼夜计时系统与觉醒有关的警觉性下降相对立，也被概括为“对立过程模型” (Dijk & Czeisler, 1994)。生理过程在觉醒阶段表现出一种促进觉醒的动力，以平衡觉醒阶段累积的睡眠驱力(Cajochen, Blatter, & Wallach, 2004)。睡眠惯性是指刚睡醒之后开始的一段低唤醒的状态，它对认知过程有不利的影响，这种影响最长能持续 4 个小时，具体则取决于之前的睡眠时长(Jewett et al., 1999)。综上可以看出，光照在生理节律睡眠驱力最大(在核心体温最低点的清晨)、较高的睡眠稳态的压力(觉醒后 16 小时以上)、睡眠惯性(刚睡醒时)时对警觉性的影响最大。

2.2 不同光照时间点对光照警觉性的影响

光照的视觉效应不受光照时间点的影响，但是光照的非视觉效应却受到光照时间点的影响。所以，光照的警觉性也受到光照时间点的影响。例如，有研究发现光照的警觉性作用在晚上或者睡眠剥夺之后特别强烈，在白天也依然存在，只是似乎比较平和(Smolders & De Kort, 2014)。夜间研究表明，与昏暗灯光的控制条件相比，不同光照强度和光照时长条件下均能显示出光照的警觉性作用。尽管光照的直接作用看起来似乎是在晚上通过视网膜投影到 SCN 从而产生的褪黑素的抑制。但是有研究发现，即使在白天，几乎检测不到褪黑素的时候，光照也能提高警觉性(Vandewalle et al., 2006; Sahin & Figueiro, 2013)。而且，正电子发射型计算机断层显像(Positron Emission Computed Tomography, PET)结果显示，警觉性的反应不仅局限于视交叉神经上核附近的下丘脑区域，而且拓展到包括注意网络在内的大规模的皮质区域，尤其是包含右侧顶内沟的大规模的枕顶叶注意网络(Perrin et al., 2004)。一项 fMRI 的研究也发现类似结果，即在白天短时间的亮光条件下也可以短暂阻止由于持续性处在黑暗中而产生的困意。光照引起的主观警觉性的提高与后侧丘脑，包括丘脑核的增强反应相一致，这与视觉模式识别、视觉注意和警觉性调节有关。光照暴露还可以导致大面积皮层网络的反应增强，包括顶骨、颞骨、枕骨以及包含注意任务对象的岛叶(Vandewalle et al., 2006)。总之，目前很少研究比较了白天和晚上光照对警觉性的影响，而且这些研究大都用的是强光复合白光(≥1000 lux)，这个照度大到足以产生最大的警觉性效应，因此可能表现不出时间的主效应。然而，目前还没有用室内典型照明照度(90~180 lux)比较白天和晚上的警觉性，故不能片面认为光照的警觉性作用独立于时间点。

2.3 不同照度的光照对警觉性的影响

Lewy, Wehr, Goodwin, Newsome 和 Markey (1980)首次证明了光照的生理效应，研究指出健康人类至少需要 1000 lux 的白光才能抑制褪黑素的产生。之后很多研究也都证明了这一点，并且经常用大于 1000 lux 的光照作为减少倒班工人的睡意、提高倒班工人工作绩效的方法(Cajochen, Zeitzer, Czeisler, & Dijk, 2000; Figueiro, Rea, Boyce, White, & Kolberg, 2001)。光照提高警觉性和工作绩效的路径之一是通过对褪黑素激素分泌的抑制。在通常条件下，一般室内照明的照度(100~200 lux)不会抑制褪黑素的产生。但是, Brainard 等人(1988)在严格的实验室控制下发现，眼睛接收的辐照度在 1.03~5.50 lux 时也会抑制褪黑素的分泌。为了探讨光照的警觉性作用中是否存在类似剂量与反应的关系这一问题, Cajochen 等人(2000)让被试晚上在实验室中暴露在小于 3 lux 的光照几小时之后，接受 6.5 小时从 3 lux 到 9100 lux 的光照。结果发现被试的慢速眼球运动减少、theta-alpha 频率的脑电活动减少、主观睡意减少，表现出了光照的即时警觉性反应。光照警觉性的指数随照度的变化呈现出了一种对数剂量反应曲线，在 9100 lux 时警觉性最高，在 100 lux 时出现中值。这个剂量反应函数的特征描绘了光照警觉性的效应。同时, Smith, Schoen 和 Czeisler (2004)发现如果个体之前处于一个较高强度的光环境中，则会导致由于光照而减少褪黑素抑制的量减少 10%~15%。但由于光照抑制褪黑素的分泌只是一条提高警觉性的通道，因此减少褪黑素抑制是否意味着更少的警觉性反应还需要进一步探讨。

2.4 不同波长的光照对警觉性的影响

传统的感光细胞对 555 nm 的中间波长的光比较敏感，而新型的感光细胞对 460 nm 的短波长

的光比较敏感。例如研究发现相比波长更短的紫光(430 nm)或者波长更长的绿光(550 nm, 555 nm)和红光(600 nm, 630 nm), 暴露在 460nm 的短波长蓝光下个体的警觉性更高(Rahman et al, 2014; Okamoto & Nakagawa, 2015)。并且, 较低照度下的短波单色光便可以影响个体的警觉性(Figueiro, Bullough, Bierman, Fay, & Rea, 2007; Chellappa et al., 2014; Papamichael, Skene, & Revell, 2012)。Revell, Arendt, Fogg 和 Skene (2006)对 5 种不同波长(420 nm, 440 nm, 470 nm, 600 nm)的光进行了比较, 也发现低照度的光对个体主观警觉性的影响在短波长的光照中效应最大。其中 ipRGCs 对 480 nm 波长的光最为敏感, 因此在 480 nm 光条件下会抑制褪黑素的分泌。而波长更短的光(420 nm)很有可能通过视锥细胞影响非视觉成像反应(Hattar et al., 2006; Panda et al., 2005)。Chellappa 等人(2011)发现增加复合光中的短波长成分可以提高警觉性。因此, 暴露在短波长的光照下或许是提高夜班工作人员警觉性的可行方法。但是, Güler 等人(2008)在啮齿动物中发现, 光照在不存在视黑蛋白的条件下通过视锥细胞和视杆细胞的作用同样可以影响非视觉成像的功能。后来在人类实验中也发现了光照并不单单是通过内在光敏感性神经节细胞抑制褪黑素这一通道来提高警觉性的。例如 Sahin 和 Figueiro (2013)在中午饭后 1~1.5 小时探讨被试在红光(630 nm, 40 lux)、蓝光(470 nm, 40 lux)和暗光(< 0.01 lux)环境中的脑电波的变化, 结果发现, 蓝光条件下的警觉性的提高并没有达到显著性, 而红光条件下的警觉性显著提高。还有研究者发现, 当困意很高时, 即使暴露在屏蔽掉短波光的光照下 30 分钟, 依然可以提高人们在夜晚中的警觉性(Sasseville, Martin, Houle, & Hébert, 2015)。

2.5 不同色温的光照对警觉性的影响

自大量研究证实了蓝光对警觉性具有很大影响后, 研究者开始探讨短波成分较多的复合白光对个体警觉性的影响, 即探讨不同色温对光照警觉性的影响。目前大多数研究都发现, 色温越高, 警觉性越高(Mills, Tomkins, & Schlangen, 2007; Viola, James, Schlangen, & Dijk, 2008; Iskra-Golec, Wazna, & Smith, 2012)。例如, 有研究发现, 相比正常光照条件, 在短波成分较多的复合白光的照明环境下, 睡意和褪黑素节律均显著下降(Motamedzadeh, Golmohammadi, Kazemi, & Heidarimoghadam, 2017)。在某些环境中, 使用短波成分较多的白光或许是提高工作绩效和警觉性的一个人体工程学策略。Chellappa 等(2011)比较了两种不同色温的节能灯(40 lux, 6500 K 和 40 lux, 2500 K)和一种白炽灯(40 lux, 3000 K)在晚上对警觉性的影响, 结果发现 6500 K 的光照在减少睡意、提高认知任务尤其是提高持续性注意任务上的效果更优。但也有部分研究得出了不一致的结论。例如 Smolders 和 De Kort (2017)探讨了不同时间点(上午 vs.下午)在不同色温照明环境(2700 K, 500 lux vs. 6000 K, 500 lux)下暴露 1 小时对个体的活力、任务绩效和唤醒度的影响。结果发现, 除了早上在 6000 K 色温的光照下被试有较高的主观活力之外, 在唤醒度等方面的影响均没有显著差异。因此, 晚上的结果几乎一致, 高色温引发高警觉性; 白天的结果尚且不太一致。除此之外, 大多数关于色温的研究中所用到的色温水平不一致, 而色温是否和照度一样存在反应剂量曲线, 还有待进一步的研究。

3 光照的应用领域

3.1 光照在生理节律中的应用

光照可以解决昼夜节律相关的睡眠障碍和昼夜中断相关的时差问题、轮班工作问题和航空飞行问题(Lucas et al., 2014)。Smith 和 Eastman (2012)研究发现晚上光照可以延迟生理节律时相, 能够在轮班工作中提高工作绩效。但夜间的亮光或蓝光会抑制褪黑素的分泌, 导致昼夜中断, 这两者都与增加健康风险有关, 使用蓝光或亮光似乎不是一个好的选择。而波长较长的红光在不抑制褪黑素分泌的条件下依然能够提高警觉性, 保持绩效水平(Figueiro, Bierman, Plitnick, & Rea, 2009; Plitnick, Figuerio, Wood, & Rea, 2010), 因此红光或许可以作为晚上照光的一种替代光源。例如有研究发现, 夜间暴露在红光环境下可以让护士在不抑制褪黑素分泌和改变生理节律的同时保持工作的警觉性(Figueiro, Sahin, Wood, & Plitnick, 2016)。还有研究发现, 含短波成分较少的复合白光可以在不损害认知功能和警觉性的同时, 对倒班工人的心脏机能有积极的作用(Canazei, Pohl, Bliem, & Weiss, 2017)。同时需要注意的是, 光照对生理节律系统的敏感性受到短期内光照强度的影响, 白天光照强度越大, 光照对生理节律的影

响的敏感性越低(Hanford & Figueiro, 2013)。

3.2　光照疗法在精神障碍中的应用

光疗由于较短的潜伏期和较小的副作用, 逐渐成为治疗睡眠问题、阿尔茨海默病和相关痴呆(Alzheimer's disease and related dementias, ADRD)、季节性情感障碍(seasonal affective disorder, SAD)等神经和精神障碍的有效方法(Shirani & St. Louis, 2009; Hanford & Figueiro, 2013)。除了正常人群会由于轮班或跨时区旅行等原因产生睡眠问题外, 某些特殊疾病如 ADRD 等也会引发一系列睡眠问题 (Figueiro, Plitnick, & Rea, 2016; Figueiro, 2017)。一项关于光疗对睡眠问题的元分析中, 纳入了 53 个研究共计 1154 名被试, 结果发现, 总体上光疗对治疗诸如昼夜节律睡眠障碍、失眠、阿尔茨海默症和相关痴呆有关的睡眠障碍都很有效。其中, 光疗对昼夜节律睡眠障碍和失眠症状的治疗效果效应量最大; 在失眠症的治疗中, 使用光疗的光照度越大, 效应量越大; 在治疗阿尔茨海默症和相关痴呆有关的睡眠障碍中, 女被试越多效应量越大(van Maanen, Meijer, van der Heijden, & Oort, 2016)。同时, 很多研究还发现恰当的光照暴露可以提高 ADRD 患者的夜间睡眠效率, 减少日间游荡, 缓解晚上焦躁不安, 是治疗 ADRD 的一种有效的非药物治疗方法。通常, 治疗 ADRD 时所用光照都是 2500~8000 lux 的亮白光, 一般是清晨光照 1 h 以上, 至少持续 2 周(Figueiro et al., 2014)。有研究者发现利用一个自发光的桌子来进行光照干预也可以提高 ADRD 病人的睡眠、情绪和行为(Figueiro, Plitnick et al., 2016)。Hanford 等人甚至提出未来可以制定一个治疗 ADRD 病人的 24 小时光照计划(Hanford & Figueiro, 2013)。除此之外, 光疗也是有效治疗 SAD 的非药物手段。Terman 等(1989)对来自 14 个不同研究中心的 332 例 SAD 患者进行系统分析后发现, 接受光疗之后, 轻度抑郁症患者的抑郁症状缓解率高达 67%, 重度抑郁症患者的缓解率高达 40%。Golden 等人(2005)的元分析结果也表明, 光照能有效缓解 SAD 患者的抑郁症状, 其效果大小相当于大多数抗抑郁药物治疗试验中的效果大小。在 SAD 的治疗中, 一般每日用 10000 lux 的光照 30 min, 或用 2500 lux 的光照 2 h; 相较于夜间, 清晨醒后进行光疗的效果更好(Lewy et al., 1998; Figueiro, 2017)。随后, 众多学者发现光疗对于非季节性抑郁、产前抑郁症、双向抑郁等情感障碍的治疗也有一定的促进作用(Even, Schröder, Friedman, & Rouillon, 2008; Wirz-Justice et al., 2011; Tseng et al.,2016; Al-Karawi & Jubair, 2016)。如在一项非季节性抑郁的强光疗法的元分析研究中, 纳入了 9 个临床实验共 419 名病人, 结果发现强光治疗对非季节性抑郁非常有效。其中强光治疗 2~5 周时抗抑郁的效果量最大; 作为单一疗法时效果显著, 作为抗抑郁药物的附属疗法时则效果不显著(Al-Karawi & Jubair,2016)。还有研究对比了普通室内光照和自然强光下 21 名轻度抑郁的老年住院患者的情绪、行为和心脏的压力反应, 结果发现即使是自然强光也能够减轻消极情绪和生理症状的压力(Canazei, Pohl, Bauernhofer et al., 2017)。总之, 光疗作为一种非药物疗法, 在众多神经和精神障碍的治疗中都可能卓有成效, 但目前除了在治疗 SAD 时有较明确的光照设置外, 在治疗其他精神障碍时的最佳光照时长、长度、时间点和疗程时长等尚不明确, 未来研究中需要进一步的深入探讨。

3.3　光照在办公照明中的应用

有益健康的照明环境可以减弱眼部疲劳、改善人的情绪并提高工作效率。光照的警觉性作用和对提高绩效的影响在建筑中的室内光设计中越来越普遍。一般来说, 办公环境的照度越高, 员工警觉性越高, 工作效率也越高。例如, Smolders, De Kort 和 Cluitmans (2012)比较了 32 名被试分别在上午和下午暴露在 200 lux 和 1000 lux 的光照下 1 小时, 结果发现即使在正常白天条件下(即没有睡眠剥夺), 光照强度越大, 个体的警觉性和活力也越高, 生理唤醒和工作绩效也越高。但现代的办公室照明仍然有很多都不能满足光照非视觉效应的标准。Aries (2005)研究发现办公室照明中的垂直照度大于 1000 lux 的比例不到 20%, 在控制了性别、年龄、红眼校正、季节敏感性和睡眠类型之后, 相比高照度环境, 在低照度环境中工作疲劳显著增加, 睡眠质量显著下降。传统的建筑照明主要关注视觉绩效、视觉舒适度和审美。现在需要在建筑照明中考虑到光的非视觉作用。

4　总结与展望

光是调节生理、激素和行为表现的较强环境刺激。光疗是治疗某些情感障碍、睡眠问题和生

理节律紊乱的有效方式。可以说，对光进行的研究具有重要的意义。ipRGCs 的发现推动研究者进一步发现了非图像形成的新型感光系统及与其联结的神经回路。但光照警觉性的研究才刚刚起步，并且大多是变量分散的研究，缺少系统全面的研究。未来应该着重从以下几个方向展开研究。

4.1 探讨光照警觉性的神经机制

随着认知神经科学的发展，研究者们也开始利用这种技术来探究环境光照对个体警觉性影响的神经机制。早期，Perrin 等人(2004)利用正电子断层扫描技术(PET)来探测夜间不同复合光照度环境下被试执行听觉注意任务的脑区激活情况，发现被试在高照度复合光下，与警觉、注意相关的顶-枕区注意网络(特别是顶内沟)被显著激活。随后 Vandewalle 等人(2006)使用功能性磁共振成像技术(fMRI)比较了白天不同复合光照度下个体执行注意任务时的脑区活动，结果发现高照度条件下显著激活背侧丘脑、右侧上顶叶和顶内沟等与注意相关的大脑皮层区，而低照度条件下相关脑区激活并不明显。除了高照度复合光，在单色光环境下执行注意任务时的大脑活动也有显著变化。例如, Okamoto 和 Nakagawa (2015)使用 ERPs 技术发现，相比无光照的照明环境，被试在短波长的光照环境下执行注意相关的任务时 P300 振幅会显著增大，而中波长和长波长光照环境下的 P300 振幅则无显著差异。虽然前人已经发现光的警觉性相应脑区的激活，但是关于光照通过何种路径而对警觉性产生作用尚未定论。光对生理和行为的影响除了受到传统的视锥细胞和视杆细胞的影响之外，还受到一种新型的感光细胞——自主感光神经节细胞(ipRGCs)的影响(Lucas et al., 2014)。ipRGCs 有一种特殊的非视觉视网膜下丘脑束，用来提供和视交叉上核的直接神经连接，并且通过视交叉上核直接或间接的投射到和觉醒相关的大脑区域。此外，视交叉上核还与调节褪黑素的松果体相连，同时与外侧膝状体核、前顶盖、上丘等与视觉感光系统共享的区域相连(Lockley & Gooley, 2006)。所以通常认为，光照的警觉性作用是通过光敏感性神经节细胞抑制褪黑素的分泌而作用，但有一些研究者得出了不同的结果，没有褪黑素的抑制也能产生光照的警觉性作用(Sahin & Figueiro, 2013; Sasseville et al., 2015; Figueiro, Sahin et al., 2016)，甚至有结果得出传统感光细胞和 ipRGCs 影响光照警觉性的条件不一致。例如, Gooley 等(2010)发现视锥细胞在光照开始和较低照度水平下时对光照的非视觉作用起重要作用，而新型自主感光神经节细胞则在长时间光照和高照度时对光照的非视觉性作用有重要影响。因此，光照如何作用于大脑的唤醒系统，以何种路径激活大脑的唤醒系统目前尚不清楚。为了进一步解释光照的警觉性作用机制，Rautkylä, Puolakka 和 Halonen (2012)基于神经元连接的角度提出光照影响警觉性的双通道模型(图 2)，他认为光照除了通过生物节律系统(即 SCN 调控褪黑素分泌)影响警觉性，还能直接作用于边缘系统(如杏仁核)产生对光信号的情绪反应，在神经元连接的作用下到达唤醒系统，从而提高个体的警觉性。双通道模型从宏观层面上为我们解释日间光照影响警觉性的神经机制提供了重要的理论依据，即光照可能通过影响情绪状态，从而影响警觉性。然而双通道模型尚处于理论建构水平，还未得到相关的实验验证，因此未来研究还需进一步验证该模型的适用性。综上，我们可以看出目前已知的光照警觉性的神经机制只是冰山一角，未来需要对不同光照(照度高/低，单色光/复合光，作用时间长/短)达到视网膜后由何种感光细胞通过何种路径影响警觉性的神经机制进行深入探讨。

4.2 优化光照警觉性的参数特征

高照度的灯光照射或蓝光照明均可在短时间内起到调节内在生理节律、促进个体清醒、保持正常的活动状态等作用(朱莹莹，汝涛涛，周国富，2015)。但在一项研究中，60 个成年被试经过慢性睡眠限制后，暴露在不同波长的光照下(458~480 nm 的蓝光、551~555 nm 的绿光, 0 lux 的暗光控制)。研究人员对光照暴露前、暴露中、暴露后的警觉性进行了测量，结果发现均没有显著差异(Segal, Sletten, Flynn-Evans, Lockley, & Rajaratnam, 2016)。所以，睡眠压力、生理阶段和光照反应曲线之间可能存在一定的交互作用。虽然研究者们一致认为夜晚照射蓝光或富含短波长的白光会促进警觉性，但对白天警觉性的敏感波长的研究仍存在分歧。例如 Sahin 和 Figueiro (2013)证实白天的红光比蓝光对人的警觉性的作用更大。另外还有研究考察了动态光对人警觉性和表现的影响，结果发现相比静态光，动态光更让人警觉(罗明，郑诗琪，叶鸣, 2016)。因此未来的研究可以从动态

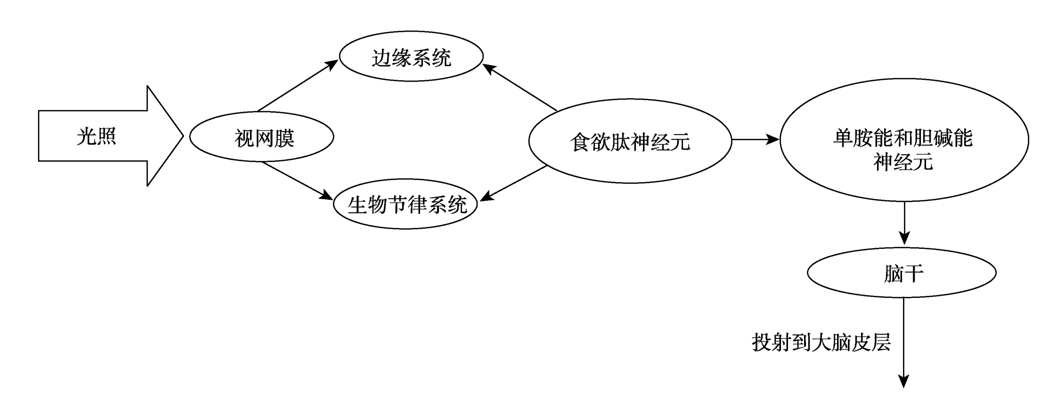


图 2　光照警觉性的双通道模型(资料来源：Rautkylä et al, 2012)

角度去探讨随着 24 h 的变化光照警觉性的光谱敏感性的变化，进一步优化在白天能够引起警觉性的光照系统的参数特征。

4.3　探讨光照警觉性的混淆变量

现在的研究大都强调光照在任务中对认知神经功能的影响。比如有研究认为在亮白光或蓝光成分较多的白光环境中可以提高警觉性和神经活动过程(Cajochen et al., 2005; Lockley et al., 2006)。但是这种光照警觉性的影响并不总是促进行为表现。实际上，有研究报告了光照可能会对认知任务产生不利的作用或者没有显著差异的影响(Gabel et al., 2015; Kaida, Takeda, & Tsuzuki, 2013)。同时也有研究发现，光照效应在抑制控制任务上的表现有很大的个体差异性，并且取决于被试实验前的警觉性状态(Correa, Barba, & Padilla, 2016)。实验前处于较高警觉性状态的被试在经过蓝光成分较多的白光照射之后，在高级认知任务上的成绩更好。这提示我们在探讨光照效应的时候要注意实验之前的警觉性。所以，对光照警觉性的混淆变量进行研究，排除或控制一些混淆变量，对我们更好的理解光照的非视觉效应至关重要。

参考文献

董栩然, 王旻舒, 刘梦媛, 王薇. (2014). 光照对昼夜节律与警觉度的影响. *科学通报, 59*(23), 2253–2259.

罗明, 郑诗琪, 叶鸣. (2016). 动态光对人警觉度与表现的影响. *照明工程学报, 27*(6), 1–5.

曾强, 何士刚. (2011). 视网膜中的自主感光神经节细胞. *生物物理学报, 27*(5), 387–394.

朱莹莹, 汝涛涛, 周国富. (2015). 照明的非视觉作用及其脑神经机制. *心理科学进展, 23*(8), 1348–1360.

Adamsson, M., Laike, T., & Morita, T. (2017). Annual variation in daily light exposure and circadian change of melatonin and cortisol concentrations at a northern latitude with large seasonal differences in photoperiod length. *Journal of Physiological Anthropology, 36*, 6.

Al-Karawi, D., & Jubair, L. (2016). Bright light therapy for nonseasonal depression: Meta-analysis of clinical trials. *Journal of Affective Disorders, 198*, 64–71.

Aries, M. B. C. (2005). Human lighting demands: Healthy lighting in an office environment. *Photochemistry & Photobiology, 91*(3), 567–573.

Berson, D. M., Dunn, F. A., & Takao, M. (2002). Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock. *Science, 295*, 1070–1073.

Brainard, G. C., Lewy, A. J., Menaker, M., Fredrickson, R. H., Miller, L. S., Weleber, R. G., … Hudson, D. (1988). Dose-response relationship between light irradiance and the suppression of plasma melatonin in human volunteers. *Brain Research, 454*, 212–218.

Cajochen, C. (2007). Alerting effects of light. *Sleep Medicine Reviews, 11*, 453–464.

Cajochen, C., Blatter, K., & Wallach, D. (2004). Circadian and sleep-wake dependent impact on neurobehavioral function. *Psychologica Belgica, 44*, 59–80.

Cajochen, C., Khalsa, S. B. S., Wyatt, J. K., Czeisler, C. A., & Dijk, D. J. (1999). EEG and ocular correlates of circadian melatonin phase and human performance decrements during sleep loss. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology, 277*(3), R640–R649.

Cajochen, C., Münch, M., Kobialka, S., Kräuchi, K., Steiner, R., Oelhafen, P., ... Wirz-Justice, A. (2005). High sensitivity of human melatonin, alertness, thermoregulation, and heart rate to short wavelength light. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism, 90*(3), 1311–1316.

Cajochen, C., Zeitzer, J. M., Czeisler, C. A., & Dijk, D. J. (2000). Dose-response relationship for light intensity and

ocular and electroencephalographic correlates of human alertness. *Behavioural Brain Research, 115*(1), 75–83.

Canazei, M., Pohl, W., Bliem, H. R., & Weiss, E. M. (2017). Acute effects of different light spectra on simulated night-shift work without circadian alignment. *Chronobiology International, 34*(3), 303–317.

Canazei, M., Pohl, W., Bauernhofer, K., Papousek, I., Lackner, H. K., Bliem, H. R., & Weiss, E. M. (2017). Psychophysiological effects of a single, short, and moderately bright room light exposure on mildly depressed geriatric inpatients: A pilot study. *Gerontology, 63*, 308–317.

Chellappa, S. L., Steiner, R., Blattner, P., Oelhafen, P., Götz, T., & Cajochen, C. (2011). Non-visual effects of light on melatonin, alertness and cognitive performance: Can blue-enriched light keep us alert? *PLoS ONE, 6*(1), e16429.

Chellappa, S. L., Viola, A. U., Schmidt, C., Bachmann, V., Gabel, V., Maire, M., ... Cajochen, C. (2014). Light modulation of humansleep depends on a polymorphism in the clock gene *Period3*. *Behavioural Brain Research, 271*, 23–29.

Correa, Á., Barba, A., & Padilla, F. (2016). Light effects on behavioural performance depend on the individual state of vigilance. *PLoS One, 11*(11), e0164945.

Dijk, D. J., & Czeisler, C. A. (1994). Paradoxical timing of the circadian rhythm of sleep propensity serves to consolidate sleep and wakefulness in humans. *Neuroscience Letters, 166*, 63–68.

Dinges, D. F., & Powell, J. W. (1985). Microcomputer analyses of performance on a portable, simple visual RT task during sustained operations. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers, 17*(6), 652–655.

Even, C., Schröder, C. M., Friedman, S., & Rouillon, F. (2008). Efficacy of light therapy in nonseasonal depression: A systematic review. *Journal of Affective Disorders, 108*(1-2), 11–23.

Figueiro, M. G. (2017). Light, sleep and circadian rhythms in older adults with Alzheimer's disease and related dementias. *Neurodegenerative Disease Management, 7*(2), 119–145.

Figueiro, M. G., Bierman, A., Plitnick, B., & Rea, M. S. (2009). Preliminary evidence that both blue and red light can induce alertness at night. *BMC Neuroscience, 10*, 105.

Figueiro, M. G., Bullough, J. D., Bierman, A., Fay, C. R., & Rea, M. S. (2007). On light as an alerting stimulus at night. *Acta Neurobiologiae Experimentalis, 67*(2), 171–178.

Figueiro, M. G., Plitnick, B. A., Lok, A., Jones, G. E., Higgins, P., Hornick, T. R., & Rea, M. S. (2014). Tailored lighting intervention improves measures of sleep, depression, and agitation in persons with Alzheimer's disease and related dementia living in long-term care facilities. *Clinical Interventions in Aging, 9*, 1527–1537.

Figueiro, M. G., Plitnick, B. A., & Rea, M. S. (2016). Research note: A self-luminous light table for persons with Alzheimer's disease. *Lighting Research & Technology, 48*, 253–259.

Figueiro, M. G., & Rea, M. S. (2010). The effects of red and blue lights on circadian variations in cortisol, Alpha amylase, and melatonin. *International Journal of Endocrinology, 2010*, Article ID 829351.

Figueiro, M. G., Rea, M. S., Boyce, P. R., White, R., & Kolberg, K. (2001). The effects of bright light on day and night shift nurses' performance and well-being in the NICU. *Neonatal Intensive Care, 14*, 29–32.

Figueiro, M. G., Sahin, L., Wood, B. & Plitnick, B. (2016). Light at night and measures of alertness and performance: Implications for shift workers. *Biological Research for Nursing, 18*(1), 90–100.

Gabel, V., Maire, M., Reichert, C. F., Chellappa, S. L., Schmidt, C., Hommes, V., ... Viola, A. U. (2015). Dawn simulation light impacts on different cognitive domains under sleep restriction. *Behavioural Brain Research, 281*, 258–266.

Golden, R. N., Gaynes, B. N., Ekstrom, R. D., Hamer, R. M., Jacobsen, F. M., Suppes, T., ... Nemeroff, C. B. (2005). The efficacy of light therapy in the treatment of mood disorders: A review and meta-analysis of the evidence. *American Journal of Psychiatry, 162*(4), 656–662.

Gooley, J. J., Rajaratnam, S. M., Brainard, G. C., Kronauer, R. E., Czeisler, C. A., & Lockly, S. W. (2010). Spectral responses of the human circadian system depend on the irradiance and duration of exposure to light. *Science Translational Medicine, 2*(31), 31ra33.

Güler, A. D., Ecker, J. L., Lall, G. S., Haq, S., Altimus, C. M., Liao, H. W., ... Hatter, S. (2008). Melanopsin cells are the principal conduits for rod-cone input to non-image-forming vision. *Nature, 453*, 102–105.

Hanford, N., & Figueiro, M. (2013). Light therapy and Alzheimer's disease and related dementia: Past, present, and future. *Journal of Alzheimer's Disease, 33*(4), 913–922.

Hattar, S., Kumar, M., Park, A., Tong, P., Tung, J., Yau, K. W., & Berson, D. M. (2006). Central projections of melanopsin-expressing retinal ganglion cells in the mouse. *The Journal of Comparative Neurology, 497*(3), 326–349.

Horne, J. A., & Burley, C. V. (2010). We know when we are sleepy: Subjective versus objective measurements of moderate sleepiness in healthy adults. *Biological Psychology, 83*(3), 266–268.

Iskra-Golec, I. M., Wazna, A., & Smith, L. (2012). Effects of blue-enriched light on the daily course of mood, sleepiness and light perception: A field experiment. *Lighting Research and Technology, 44*, 506–513.

Jewett, M. E., Wyatt, J. K, Ritz-De Cecco, A., Khalsa, S. B., Dijk, D. J., & Czeisler, C. A. (1999). Time course of sleep inertia dissipation in human performance and alertness. *Journal of Sleep Research, 8*, 1–8.

Kaida, K., Takeda, Y., & Tsuzuki, K. (2013). The effects of short afternoon nap and bright light on task switching performance and error-related negativity. *Sleep and Biological Rhythms, 11*(2), 125–134.

Lewy, A. J., Bauer, V. K., Cutler, N. L., Sack, R. L., Ahmed, S., Thomas, K. H., ... Jackson, J. M. L. (1998). Morning vs evening light treatment of patients with winter depression. *Archives of General Psychiat*ry*, 55*(10), 890–896.

Lewy, A. J., Wehr, T. A., Goodwin, F. K., Newsome, D. A., & Markey, S. P. (1980). Light suppresses melatonin secretion in humans. *Science, 210*, 1267–1269.

Lockley, S. W., Evans, E. E., Scheer, F. A. J. L., Brainard, G. C., Czeisler, C. A., & Aeschbach, D. (2006). Short-wavelength sensitivity for the direct effects of light on alertness, vigilance, and the waking electroencephalogram in humans. *Sleep, 29*, 161–168.

Lockley, S. W., & Gooley, J. J. (2006). Circadian photoreception: Spotlight on the brain. *Current Biology, 16*, R795–R797.

Lucas, R. J., Peirsonet, S. N., Berson, D. M., Brown, T. M., Cooper, H. M., Czeisler, C. A., … Brainard, G. C. (2014). Measuring and using light in the melanopsin age. *Trends in Neuroscience, 37*(1), 1–9.

Martinez, D., Cataldo Breitenbach, T., Sabtos Lumertz, M., Lerias Alcântara, D., da Rocha, N. S., Maria Cassol, C. & Sfreddo Lenz, M. D. C. (2011). Repeating administration of Epworth Sleepiness Scale is clinically useful. S*leep and Breath, 15*(4), 763–773.

Mills, P. R., Tomkins, S. C., & Schlangen, L. J. (2007). The effect of high correlated colour temperature office lighting on employee well-being and work performance. *Journal Circadian Rhythms, 5*, 2.

Motamedzadeh, M., Golmohammadi, R., Kazemi, R., & Heidarimoghadam, R. (2017). The effect of blue-enriched white light on cognitive performances and sleepiness of night-shift workers: A field study. *Physiology & Behavior, 177*, 208–214.

Okamoto, Y., & Nakagawa, S. (2015). Effects of daytime light exposure on cognitive brain activity as measured by the ERP P300. *Physiology & Behavior, 138*, 313–318.

Panda, S., Nayak, S. K., Campo, B., Walker, J. R., Hogenesch, J. B., & Jegla, T. (2005). Illumination of the melanopsin signaling pathway. *Science, 307*, 600–604.

Papamichael, C., Skene, D. J., & Revell, V. L. (2012). Human nonvisual responses to simultaneous presentation of blue and red monochromatic light. *Journal of Biological Rhythms, 27*, 70–78.

Perrin, F., Peigneux, P., Fuchs, S., Verhaeghe, S., Laureys, S., Middleton, B., ... Dijk, D. J. (2004). Nonvisual responses to light exposure in the human brain during the circadian night. *Current Biology, 14*, 1842–1846.

Plitnick, B., Figueiro, M. G., Wood, B., & Rea, M. S. (2010). The effects of red and blue light on alertness and mood at night. *Lighting Research and Technology, 42*, 449–458.

Rahman, S. A., Flynn-Evans, E. E., Aeschbach, D., Brainard, G. C., Czeisler, C. A., & Lockley, S. W. (2014). Diurnal spectral sensitivity of the acute alerting effects of light. *Sleep, 37*(2), 271–281.

Rautkylä, E., Puolakka, M., & Halonen, L. (2012). Alerting effects of daytime light exposure: A proposed link between light exposure and brain mechanisms. *Lighting Research & Technology, 44*(2), 238–252.

Revell, V. L., Arendt, J., Fogg, L. F., & Skene, D. J. (2006). Alerting effects of light are sensitive to very short wavelengths. *Neuroscience Letters, 399*, 96–100.

Sahin, L., & Figueiro, M. G. (2013). Alerting effects of short-wavelength (blue) and long-wavelength (red) lights in the afternoon. *Physiology & Behavior, 116–117*, 1–7.

Sasseville, A., Martin, J. S., Houle, J., & Hébert, M. (2015). Investigating the contribution of short wavelengths in the alerting effect of bright light. *Physiology & Behavior, 151*, 81–87.

Segal, A. Y., Sletten, T. L., Flynn-Evans, E. E., Lockley, S. W., & Rajaratnam, S. M. W. (2016). Daytime exposure to short- and medium-wavelength light did not improve alertness and neurobehavioral performance. *Journal of Biological Rhythms, 31*(5), 470–482.

Shirani, A., & St. Louis, E. K. (2009). Illuminating rationale and uses for light therapy. *Journal of Clinical Sleep Medicine, 5*, 155–163.

Smith, M. R., & Eastman, C. I. (2012). Shift work: Health, performance and safety problems, traditional countermeasures, and innovative management strategies to reduce circadian misalignment. *Nature and Science of Sleep, 4*, 111–132.

Smith, K. A., Schoen, M. W., & Czeisler, C. A. (2004). Adaptation of human pineal melatonin suppression by recent photic history. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism, 89*, 3610–3614.

Smolders, K. C. H. J., De Kort, Y. A. W., & Cluitmans, P. J. M. (2012). A higher illuminance induces alertness even during office hours: Findings on subjective measures, task performance and heart rate measures. *Physiology & Behavior, 107*, 7–16.

Smolders, K. C. H. J., & De Kort, Y. A. W. (2014). Bright light and mental fatigue: Effects on alertness, vitality, performance and physiological arousal. *Journal of Environmental Psychology, 39*, 77–91.

Smolders, K. C. H. J., & De Kort, Y. A. W. (2017). Investigating daytime effects of correlated colour temperature on experiences, performance, and arousal.

Journal of Environmental Psychology, 50, 80–93.

Terman, M., Terman, J. S., Quitkin, F. M., McGrath, P. J., Stewart, J. W., & Rafferty, B. (1989). Light therapy for seasonal affective disorder. *Neuropsychopharmacology, 2*(1), 1–22.

Tseng, P. T., Chen, Y. W., Tu, K. Y., Chung, W., Wang, H. Y., Wu, C. K., & Lin, P. Y. (2016). Light therapy in the treatment of patients with bipolar depression: A meta-analytic study. *European Neuropsychopharmacology, 26*(6), 1037–1047.

Vandewalle, G., Balteau, E., Phillips, C., Degueldre, C., Moreau, V., Sterpenich, V., ... Maquet, P. (2006). Daytime light exposure dynamically enhances brain responses. *Current Biology, 16*(16), 1616–1621.

Vandewalle, G., Collignon, O., Hull, J. T., Daneault, V., Albouy, G., Lepore, F., ... Carrier, J. (2013). Blue light stimulates cognitive brain activity in visually blind individuals. *Journal of Cognitive Neuroscience, 25*, 2072–2085.

van Maanen, A., Meijer, A. M., van der Heijden, K. B., & Oort, F. J. (2016). The effects of light therapy on sleep problems: A systematic review and meta-analysis. *Sleep Medicine Reviews, 29*, 52–62.

Viola, A. U., James, L. M., Schlangen, L. J., & Dijk, D. J. (2008). Blue-enriched white light in the workplace improves self-reported alertness, performance and sleep quality. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health, 34*(4), 297–306.

Wirz-Justice, A., Bader, A., Frisch, U., Stieglitz, R. D., Alder, J., Bitzer, J., ... Riecher-Rössler, A. (2011). A randomized, double-blind, placebo-controlled study of light therapy for antepartum depression. *Journal of Clinical Psychiatry, 72*(7), 986–993.

Effects of light on alertness

MAO Tianxin[1]; XIONG Xiao[1]; LI Jinghua[1]; YAO Ying[1];
YANG Jian[1]; LI Xiaoran[3]; ZHOU Guofu[2,3]

([1] School of Psychology, South China Normal University, Guangzhou 510631, China)

([2] Guangdong Provincial Key Laboratory of Optical Information Materials and Technology & Institute of Electronic Paper Displays, South China Academy of Advanced Optoelectronics, South China Normal University, Guangzhou 510006, *China*)

(*[3] Shenzhen Guohua Optoelectronics Tech. Co. Ltd., Shenzhen* 518110, *China*)

Abstract: Besides affecting vision, light exerts powerful non-visual effects on a wide range of biological functions and behaviors, such as modulating circadian rhythm, melatonin suppression, and acute alertness. Comprehensive studies on the effect of light on human circadian rhythm now lead more researchers to pay attention to the effects of light on acute alertness. Here, we summarized (1) different measures of alertness, (2) factors that may influence the effect of light on alertness like illuminance, exposure, timing, wavelength and color temperature, (3) promising applications of the alerting effect of light in some affective disorders, circadian rhythm, and office lighting, and (4) future directions focusing on investigation of neural mechanisms, optimal lighting characteristics, and potential confounds.

Key words: light; alertness; melatonin; intrinsically photosensitive retinal ganglion cells; circadian rhythm